5T

УДК 004.896

В.Н. Ткаченко, Т.С. Хашан, Р.И. Мануйленко
Институт прикладной математики и механики НАН Украины (ИПММ НАНУ)
Украина, 83114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 74

Экстремальная постановка задачи определения координат источника звука в условиях избыточности информации

V.N. Tkachenko, T.S. Khashan, R.I. Manuilenko
Institute of Applied Mathematics and Mechanics, NAS of Ukraine (IAMM NASU)
Ukraine, 83114, Donetsk, R.Luxemburg str., 74

Extreme Formulation of the Problem of Determining the Origin of the Sound Source in Information Redundancy Conditions

В.Н. Ткаченко, Т.С. Хашан, Р.И. Мануйленко
Інститут прикладної математики і механіки НАН України (ІПММ НАНУ)
Україна, 83114, м. Донецьк, вул. Р. Люксембург, 74

Екстремальна постановка задачі визначення координат джерела звуку в умовах надмірності інформації

В статье рассматривается задача определения координат источника звука в условиях избыточности информации. Такая задача возникает при пространственной локализации источника звука группой мобильных роботов, оснащенных бинауральными системами технического слуха. В работе рассмотрены два подхода к решению данной проблемы: формулировка необходимых условий экстремума квадратичного функционала с последующим решением полученной нелинейной системы уравнений и применение численных методов градиентной минимизации. Представлены результаты численных исследований, основанных на этих двух подходах.
Ключевые слова: группа мобильных роботов, координаты источника звука, избыточность информации, метод Ньютона, метод наискорейшего спуска.

The article deals with the problem of determining the origin of the sound source in a information redundancy conditions. This problem arises at spatial localization of a source of a sound by group of the mobile robots equipped with binaural systems of technical hearing. The paper discusses two approaches to solving this problem: the formulation of necessary conditions of an extremum of square functional and then solving of the received non-linear system of the equations and numerical methods of the gradient minimization. The paper presents the results of numerical studies based on these two approaches.
Key words: group of mobile robots, coordinates of sound source, information redundancy, Newton's method, steepest descent method.

У статті розглядається задача визначення координат джерела звуку в умовах надмірності інформації. Така задача виникає при просторовій локалізації джерела звуку групою мобільних роботів, оснащених бінауральними системами технічного слуху. У роботі розглянуті два підходи до вирішення даної проблеми: формулювання необхідних умов екстремуму квадратичного функціонала з наступним рішенням отриманої нелінійної системи рівнянь і застосування чисельних методів градієнтної мінімізації. Представлені результати чисельних досліджень, заснованих на цих двох підходах.
Ключові слова: група мобільних роботів, координати джерела звуку, надмірність інформації, метод Ньютона, метод найшвидшого спуску.

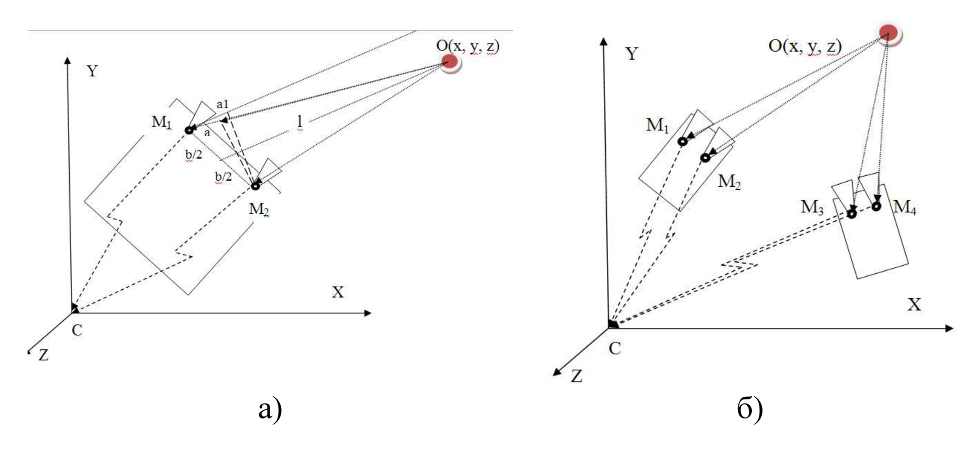
Актуальность

К числу крайне актуальных проблем, фундаментальных и прикладных исследований относится разработка «Интеллектуальной мультимедийной сети автономных мобильных агентов (роботов)» (Multimedia Intelligent Network of Unattended Mobile Agents или «Minuteman»). Данная тематика является объектом крупномасштабных исследований и для реализации этой идеи в развитых странах (США, Японии, России, Китае) привлечены большие коллективы научных работников ведущих университетов [1-3].

Преимущества группового применения интеллектуальных роботов очевидны: совместное, скоординированное в пространстве и во времени, выполнение общих операций, больший радиус действия, расширенный набор выполняемых функций, более высокая вероятность выполнения задания, достигаемая за счет возможности перераспределения целей между роботами группы в случае выхода из строя некоторых из них.

В работах [1-6] указаны основные задачи, решаемые мультимедийной сетью автономных роботов. Одна из основных задач таких систем – пассивный анализ окружающей акустической обстановки и локализация (определение координат) объекта, излучающего требуемый звуковой сигнал.

В работах [5], [6] локализация источника звука (ИЗ) осуществляется одним мобильным роботом (двумерная задача), на борту которого установлены две приемные акустические антенны (система технического слуха, СТС). СТС работает по принципу бинаурального слуха (рис. 1а). При помощи разностно-дальномерного метода решается задача определения координат ИЗ.



а) б)

Рисунок 1 – Принцип пассивной локации звука: а) одна СТС, б) две СТС

На рис. 1а и 1б (и далее) приняты следующие обозначения:

$M_j(x_j,y_j,z_j)$ – j-я принимающая акустическая антенна с соответствующими координатами для мобильных роботов с СТС из двух микрофонов;

b_i – база СТС, соответственно $b_i/2$ – расстояние от принимающего сенсора до центральной оси корпуса робота (для рис. 2б);

$C(0,0,0)$ – базовая станция наблюдения, начало координат;

$O(x,y,z)$ – объект, источник звука (ИЗ).

Как видно из рис. 1а, задержка времени прихода j-о сигнала на станцию C от M_j:

$$\tau_j = \frac{1}{c}\cdot\left(\overline{OM_j} + \overline{CM_j} - \overline{OC}\right), \quad (1)$$

где τ_j – задержки времени прихода сигнала ИЗ на станцию С от принимающих антенн, $\overline{OM_j}$ – расстояния между ИЗ и принимающими акустическими антеннами, $\overline{CM_j}$ –

расстояния между станциями и пунктом приема сигналов, $\overline{OC}$ – расстояние между ИЗ и пунктом приема сигналов (базовой станцией), $j=\overline{1,n}$ – количество акустических принимающих антенн.

Соотношения (1) связывают времена прихода сигнала ИЗ с расстояниями между принимающими антеннами и станцией *C*, с расстояниями между всеми станциями и ИЗ, а также со скоростью *C* распространения звука в атмосфере. Расстояние от ИЗ до стационарной станции наблюдения *C* определяется следующим соотношением:

$$\overline{OC}=\sqrt{x^2+y^2+z^2}, \tag{2}$$

а до принимающих антенн M_j соотношением:

$$\overline{OM_j}=\sqrt{\left(x-x_j\right)^2+\left(y-y_j\right)^2+\left(z-z_j\right)^2}\,. \tag{3}$$

Основным недостатком использования одиночного робота – проведение дополнительных измерений (поворота базы СТС или перемещения самого робота). В динамически изменяющемся акустическом пространстве качественное решение задачи одной СТС не представляется возможным.

Пространственная локализация ИЗ подразумевает наличие не менее трех принимающих антенн и одного пункта наблюдения, на который передаются временные задержки сигналов τ_j (рис. 1б).

Выразив соотношения (1) в системе координат положения станций и ИЗ, получим систему нелинейных уравнений, в которой известны все величины, кроме координат положения ИЗ (x, y, z):

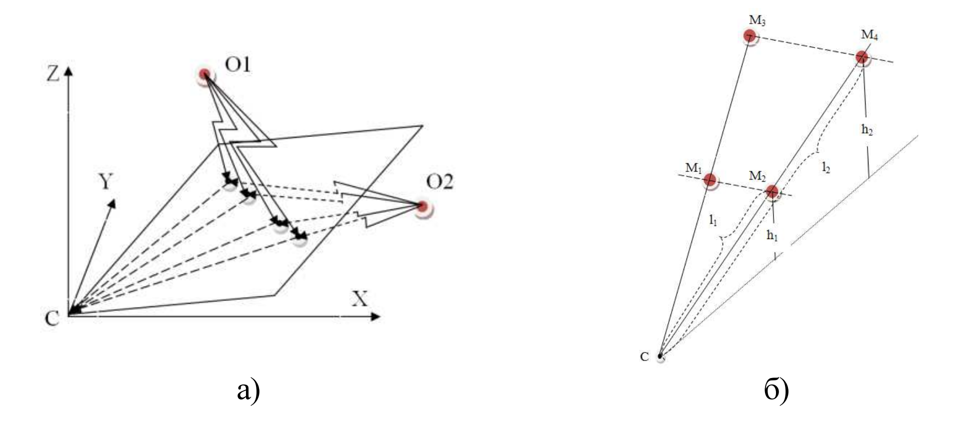
$$F_j(x,y,z)=\frac{1}{c}(\overline{OM_j}+\overline{M_jC}-\overline{OC})-\tau_j=$$
$$=\frac{1}{c}\left(\sqrt{\left(x-x_j\right)^2+\left(y-y_j\right)^2+\left(z-z_j\right)^2}+\sqrt{x_j^2+y_j^2+z_j^2}-\sqrt{x^2+y^2+z^2}\right)- \tag{4}$$
$$j=\overline{1,n}$$

Для нахождения координат ИЗ достаточно решить систему из трех уравнений. Наиболее распространенным методом решения нелинейных уравнений является итерационный метод Ньютона [7]. Этот метод позволяет получить решение (4) с заданной точностью за малое количество итераций.

Однако, использование двух СТС, либо массива микрофонов из трех принимающих антенн может приводить к неоднозначности решения, когда принимающие антенны находятся в одной плоскости (см. рис. 2а и б), устранить неоднозначность решения не всегда возможно. Также следует отметить, что корреляционные или спектральные методы определения временных задержек сигналов τ_j имеют определенную погрешность, что также приводит в дальнейшем к результирующим ошибкам при вычислениях координат ИЗ.

Целью данной работы является получение более точного решения задачи определения координат ИЗ за счет использования избыточности объема информации, которая наступает при числе задержек сигналов $n>3$.

Для достижения цели ***необходимо*** сформулировать задачу определения координат ИЗ группой мобильных роботов (не менее трех роботов), предложить эффективные методы ее решения.



а) б)

Рисунок 2 – Неоднозначность решения системы уравнений (4):
а) высоты роботов одинаковы, антенны расположены на одной окружности с центром в стационарном пункте приема, б) расположение антенн параллельно и пропорциональных высотам роботов ($\frac{h1}{h2}=\frac{l1}{l2}$)

Экстремальная постановка задачи определения координат источника звука

Рассмотрим задачу определения координат ИЗ группой мобильных роботов. Для удобства изложения материала далее будем рассматривать группу из трех роботов, соответственно из трех СТС, по две принимающей антенны в каждой. Будем считать, что базы СТС идентичны и принимающие антенны в каждой слуховой системе находятся на одинаковом расстоянии.

Система уравнений для определения координат ИЗ:

$$f_j(x,y,z)=\frac{1}{c}\left(\sqrt{(x-x_j)^2+(y-y_j)^2+(z-z_j)^2}+\sqrt{x_j{}^2+y_j{}^2+z_j{}^2}-\sqrt{x^2+y^2+z^2}\right)-\tau_j=0, \quad (5)$$

где $j=\overline{1,n}$.

Система (5) содержит уравнений больше, чем число неизвестных, т.е. $n>3$.

Задачу определения координат ИЗ в условиях избыточности сформулируем в экстремальной постановке. Для этого составим квадратичный функционал, равный сумме квадратов невязки каждого уравнения системы:

$$U(x,y,z)=\sum_{j=1}^{n}p_j\, f_j(x,y,z)^2\ , \quad (6)$$

где $j=\overline{1,n}$ и $n\geq 5$, p_j – весовые коэффициенты, оценивающие различную точность определения временных задержек сигналов τ_j.

Далее задача определения координат $O(x,y,z)$ ИЗ сводится к минимизации квадратичного функционала (6):

$$U(x,y,z)=\left(\frac{1}{c}\left(\sqrt{(x-x_j)^2+(y-y_j)^2+(z-z_j)^2}+\sqrt{x_j{}^2+y_j{}^2+z_j{}^2}-\sqrt{x^2+y^2+z^2}\right)-\tau_j\right)^2\rightarrow \min,$$

которая может быть выполнена на основе двух подходов.

Первый подход основан на получении необходимых условий экстремума функционала (6), что не сложно выполнить для квадратичного функционала. Второй подход базируется на численных методах градиентной минимизации.

Необходимые условия экстремума функционала (6) дают следующую систему нелинейных уравнений (7), решение которой получим методом Ньютона.

$$\begin{cases} \frac{\partial U(x,y,z)}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial U(x,y,z)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial U(x,y,z)}{\partial x} = 0 \end{cases}. \qquad (7)$$

Численные исследования определения координат ИЗ в условиях избыточности информации

Для вычисления координат ИЗ в работе использованы итерационные методы: метод наискорейшего спуска (для минимизации функционала (6)) и метод Ньютона (для решения системы уравнений (7)) [7]. Каждый из методов в данном случае имеет свои достоинства и недостатки. Метод скорейшего спуска сходится при практически любых начальных значениях, тогда как метод Ньютона в общем случае не гарантирует сходимость. Методы имеют разную скорость сходимости: линейную для метода скорейшего спуска и квадратичную скорость сходимости – для метода Ньютона. Поэтому вблизи искомой точки решение методом Ньютона достигается за меньшее число итераций.

Численные исследования проводились в пакете Maple. Для решения поставленной задачи в качестве исходных данных принимались координаты роботов из табл. 1. Задача определения координат в условиях избыточности решалась двумя методами и для этих методов исследовались различные способы подбора начальных приближений. Для 1-о метода начальные приближения вычислялись методом скорейшего спуска, а также методом Ньютона системы уравнений (5) для трех уравнений). Результаты вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 1 – Исходные данные координат сенсоров

№ эксперим.	Координаты сенсоров роботов		
	Робот 1 (x1;y1; z1) (x2;y2; z2)	Робот 2 (x3;y3; z3) (x4;y4; z4)	Робот 3 (x5;y5; z5) (x6;y6; z6)
1	(5,05;0,55;0,3) (5,34;0,60;0,3)	(0,66;4,12;0,3) (0,72;4,36;0,3)	(6,11;6,27;0,3) (6,27;6,11;0,3)
2	(5.25;1.55;0.3) (5.54;1.6;0.3)	(1.66;4.32;0.45) (1.72;4.56;0.45)	(8,25;8,05;0,35) (8,05;8,20;0,35)
3	(2,75;0,55;0,3) (3,03;0,6;0,3)	(0,66;2,52;0,45) (0,72;2,75;0,45)	(2,27;2,32;0,35) (2,46;2,54;0,35)

Таблица 2 – Численные исследования

№ эксперим.	(X,Y,Z)	τ_j (реальные)	τ_j (с ошибками)	1й-подход						2-й подход	
				Метод Ньютона		Метод Ньютона +метод Ньютона		Метод наискорейшего спуска + метод Ньютона		Метод наискорейшего спуска	
				Кол-во итераций	(x,y,z)	Кол-во итераций	(x,y,z)	Кол-во итераций	(x,y,z)	Кол-во итераций	(x,y,z)
1	11 88 6	0,011689 0,012338 0,000083 0,000107 0,005629 0,006064	0,01169 0,01234 0,00008 0,0001 0,00563 0,00606	48	10,95 87,96 5,93	14+22	11,02 88,05 6,02	14+ 65	10,96 88,03 6,02	120	10,95 88,03 6,02
1	32 16 3	0,010642 0,011164 0,005514 0,005821 0,001863 0,001596	0,0106 0,0112 0,0055 0,0058 0,0019 0,0016	62	31,93 15,94 2,99	13+32	32,07 15,97 3,05	13+ 56	32,05 15,96 3,01	90	32,05 15,96 3,01
2	11 88 6	0,009907 0,010554 0,000418 0,000419 0,001984 0,002293	0,0099 0,0105 0,0004 0,0004 0,0019 0,0022	62	10,94 87,92 5,98	9+28	10,93 88,08 5,97	9+ 64	10,96 88,05 5,98	108	10,96 88,05 6,02
2	32 16 6	0,000297 0,000338 0,003929 0,004229 0,002337 0,002669	0,0002 0,0003 0,0039 0,0042 0,2337 0,0026	46	31,95 15,94 5,97	10+28	31,94 16,07 5,93	10+ 46	32,04 16,05 6,01	72	32,02 16,05 6,01
2	8 10 1	0,001962 0,002202 0,002712 0,002987 0,001521 0,002046	0,0019 0,0022 0,0027 0,0029 0,0015 0,0020	36	7,98 9,94 0,99	8+12	7,98 10,04 1,01	8+62	8,03 10,04 1,03	128	8,04 10,05 1,01
3	11 88 6	0,005661 0,006261 0,000109 0,000129 0,001896 0,002293	0,0056 0,0063 0,0001 0,0001 0,0019 0,0023	56	10,97 87,91 5,98	16+44	10,97 88,06 5,95	16+44	11,05 88,04 6,04	130	11,05 88,04 5,98
3	32 16 6	0,000311 0,000348 0,002756 0,002706 0,000566 0,000482	0,0003 0,0003 0,0027 0,0027 0,0005 0,0004	48	31,96 15,95 5,96	14+24	31,93 15,06 6,09	14+ 34	32,05 16,03 6,02	60	32,05 15,97 6,03
3	8 10 1	0,001141 0,001296 0,001856 0,001803 0,000009 0,000006	0,0011 0,0012 0,0018 0,0018 0,0001 0,0001	56	7,97 9,96 0,99	10+27	7,91 9,85 1,01	10+ 68	8,04 10,01 1,03	120	8,02 10,05 1,01

Как видно из табл. 2, наименьшее количество итераций необходимо при использовании первого подхода (на основе необходимых условий экстремума). При этом метод Ньютона используется дважды, т.е. начальные приближения для метода Ньютона для решения системы (7) вычислялись методом Ньютона для 3 уравнений.

Выводы

В работе рассмотрена экстремальная задача определения координат источника звука группой мобильных роботов в условиях избыточности информации. Рассмотрены два подхода к решению данной проблемы: формулировка необходимых условий экстремума квадратичного функционала с последующим решением полученной Нелинейной системы уравнений методом Ньютона и применение численного метода градиентной минимизации – метода наискорейшего спуска.

Результаты численных исследований показали, что наименьшее количество итераций достигается при использовании первого подхода и метода Ньютона для решения полученной нелинейной системы. Также в работе выполнены численные исследования, основанные на использовании двух подходов: начальные приближения для системы уравнений (6) находились путем решения системы уравнений (7), вторая комбинация методов основана на решении трех уравнений системы (5) методом Ньютона и дальнейшее решение системы (7) методом Ньютона, но для шести уравнений. Результаты исследований показали, что наименьшее число итераций вычислений достигается за счет комбинированного подхода метода Ньютона для трех и шести уравнений.

Литература

1. Wireless Review. «Mario Gerla, UCLA researcher and director of the U.S. Navy's MinuteMan project» / Wireless Review [Электронный ресурс]. – 2002. – Режим доступа : ttp://wirelessreview.com/ar/wireless_ mario_gerla_ucla/ Date of Access 04/09/2003
2. Mobile Agent Based Evacuation System When The Battery Runs Out: EASTER / [Kaneko H., Fukazawa Y., Kumeno F.,Yoshioka N., Honiden S.] // In proceedings of First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. – P. 460.
3. Page J. Countering Security Vulnerabilities using a shared security buddy model schema in mobile agent communities / J. Page, A. Zaslavsky & M. Indrawan // Accepted for Publication at the 1st International Workshop on Safety and Security in Multi-Agent Systems. – New York, July 2004.
4. Russell S.J. Artificial Intelligence: A Modern Approach / S.J. Russell & P. Norvig // Chapter 2, Englewood Cliffs. – N.-J. : Prentice Hall, 1995.
5. Поливцев С.А. Малые шагающие роботы с системой технического слуха / С.А. Поливцев , Т.С. Хашан, В.Е. Павловский // Искусственный интеллект. – 2004. – №.3 – С. 759-765.
6. A Model Based Sound Localization System and Its Application to Robot Navigation / J. Huang, T. Supaangprapa, I. Tenakuna // Robotics and Autonomous Systems (Elsevier Science). – 1999. – Vol. 27, № 4. – P. 199-209.
7. Ортега Дж. Итерационные методы решения нелинейной системы уравнений со многими неизвестными/ Дж. Ортега, В. Рейнболдт – М. : Мир, 1975. – 558 с.

Literatura

1. Wireless Review. 2002, «Mario Gerla, UCLA researcher and director of the U.S. Navy's MinuteMan project» : http://wirelessreview.com/ar/wireless_mario_gerla_ucla/ Date of Access 04/09/2003
2. Mobile Agent Based Evacuation System When The Battery Runs Out: EASTER / [Kaneko H., Fukazawa Y., Kumeno F.,Yoshioka N., Honiden S.] // In proceedings of First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. – P. 460.
3. Page J. Countering Security Vulnerabilities using a shared security buddy model schema in mobile agent communities / J. Page, A. Zaslavsky & M. Indrawan // Accepted for Publication at the 1st International Workshop on Safety and Security in Multi-Agent Systems. – New York, July 2004.

4. Russell S.J. Artificial Intelligence: A Modern Approach / S.J. Russell & P. Norvig // Chapter 2, Englewood Cliffs. – N.-J. : Prentice Hall, 1995.
5. Polivtsev S.A. Small Walking Robots with System of Technical Hearing / S.A. Polivtsev, T.S. Khashan, V.E. Pavlovsky // Artifical Intelligence.- 2004. –№.3 – С. 759-765.
6. A Model Based Sound Localization System and Its Application to Robot Navigation / J. Huang, T. Supaangprapa, I. Tenakuna // Robotics and Autonomous Systems (Elsevier Science). – 1999. – Vol. 27, № 4. – P. 199-209.
7. Ortega J. Iterative Solution of Nonlinear Equations in Several Variable / Ortega J., Reinbolt W. – M. : Mir, 1975. – 558 p.

RESUME

V.N. Tkachenko, T.S. Khashan, R.I. Manuilenko

Extreme Formulation of the Problem of Determining the Origin of the Sound Source in Information Redundancy Conditions

The article deals with the problem of determining the origin of the sound source by group of mobile robots, equipped with binaural technical hearing system. The paper discusses two approaches to solving the problem in the extreme conditions of information redundancy: the formulation of necessary conditions for an extremum of a quadratic functional and subsequent solution of non-linear system of equations and application of numerical methods of the gradient minimization. The paper presents the result of numerical studies based on these two approaches. The results of numerical studies have shown that the smallest number of iterations is reached using the first approach – the solution of non-linear equations by Newton's method and the combination of this method with itself.

Статья поступила в редакцию 02.07.2013.